

ТЕСТИРОВАНИЕ ТРАНСИВЕРОВ SFP+ SFP+ TRANSCEIVER TESTING

Дин Майлс (Dean Miles), Tektronix

SFP+ представляет собой компактный многоскоростной оптический трансивер нового поколения с возможностью горячего подключения, работающий на скоростях от 8,5 до 11 Гбит/с и применяемый в сетях передачи или хранения данных. Стандарт SFF-8431 SFP+ описывает модуль трансивера, упрощенный по сравнению с его предшественником 10GbE, эффективно заменяющий два оптических модуля и обеспечивающий соединение волоконно-оптического кабеля с медным биаксиальным кабелем. И хотя серийный выпуск трансиверов SFP+ начался не так давно, объем их поставок уже в три раза превысил объем поставок его предшественника 10GBASE-T, и этот разрыв увеличивается из месяца в месяц.

По мере распространения SFP+ важно, чтобы инженеры познакомились с основными проблемами, связанными с тестированием устройств, поддерживающих SFP+. В этой статье мы обсудим основные возможности SFP+, а затем перейдем к проблемам тестирования. Статья опишет важные измерения TWDPc, которые связаны с верификацией SFP+ и присущими ему уникальными проблемами тестирования физического уровня. Читатель получит полезную информацию об имеющихся измерительных приборах, тестовой оснастке и средствах подключения, а также сведения об отладке и тестировании на соответствие стандарту.

МЕНЬШЕ, ДЕШЕВЛЕ, ЭФФЕКТИВНЕЙ

Модуль SFP+ (компактный подключаемый модуль) является разновидностью оптического трансивера SFP. Модуль SFP+ имеет на 30% меньшие размеры, потребляет меньше энергии, требует меньше компонентов и обходится дешевле модуля XFP, кото-



рый тоже имел меньший размер и потреблял меньше мощности по сравнению с модулями формата XENPAK и X2 на основе XAUI.

Форм-фактор SFP+ существенно упрощает функциональность оптических модулей 10G, перенося часть функций, таких как восстановление тактовой частоты и данных (CDR), компенсация электронной дисперсии (EDC), последовательно-параллельное преобразование 10G и обработка сигналов, традиционно выполняемых в модулях на основе XAUI, на физический уровень (PHY) устройств и линейных карт 10GbE. В результате модули становятся меньше, потребляют меньше энергии и позволяют повысить плотность портов при одновременном снижении стоимости по сравнению с XFP. Сейчас на рынке имеются изделия с 48 и более портами в одной стойке.

Каждый модуль SFP+ содержит оптический передатчик и приемник. С одной стороны модуля установлен разъем последовательного интерфейса SFI, способного работать с дифференциальными сигналами со скоростью до 10 Гбит/с. С другой стороны установлены оптические разъемы, соответствующие стандартам 10GbE и 8GFC. Активный кабель SFP+ имеет электрический вход и выход, причем оптический приемник и передатчик смонтированы внутри кабеля. Кроме того, активные кабели с разъемами SFP+ могут быть медными и содержать встроенные корректоры предискажений и эквалайзеры.

ПРОБЛЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ SFP+

Хотя SFP+ помогает снизить общую

стоимость системы, он создает новые проблемы проектирования и обеспечения характеристик физического уровня. Интерфейс SFI между главной платой и модулем SFP+ создает серьезные проблемы в процессе проектирования и тестирования.

Одна, очевидная, проблема связана с ростом плотности портов и временем, необходимым для тестирования устройств с числом портов 48 и более. Например, каждый тест главного передатчика состоит из 15 измерений, и каждое из этих измерений, если выполняется вручную, может занимать от 3 до 5 минут. Это значит, что инженер может потратить более часа на тестирование каждого порта и это время надо еще умножить на число портов.

Другая проблема, с которой сталкиваются современные разработчики, это проблема гладкого перехода от тестирования на соответствие стандарту к отладке. Если измерение дало отрицательный результат, то как инженер узнает о том, какой из компонентов вызвал отказ, и как он найдет исходную причину неисправности? Эта задача еще более усугубляется в связи с плотной компоновкой элементов и компактностью конструкции.

Еще одна проблема, с которой приходится сталкиваться современным разработчикам, связана с подключением: как передать выходной сигнал устройства на осциллограф. Обычно, для этого используются тестовая оснастка, но нужно быть уверенным в том, что эта тестовая оснастка тоже полностью соответствует спецификациям.

Спецификации SFF-8431 SFP+ написаны в расчете на то, что большинство разработчиков и испытателей будет использовать осциллографы эквивалентного времени. На самом деле, большинство раз-

15 ИЗМЕРЕНИЙ, ОПРЕДЕЛЕННЫХ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ПЕРЕДАТЧИКА НА СООТВЕТСТВИЕ СТАНДАРТУ

Таблица 1

№	Измерение	Рекомендованный тип сигнала	Значение			Ед. изм.
			Мин.	Ном.	Макс.	
Входные электрические характеристики главного передатчика:						
1	Диапазон выходного несимметричного напряжения	PRBS31	-0,3		4	V
2	Синфазное выходное переменное напряжение (ср. кв.)	PRBS31			15	mV (ср. кв.)
Джиттер и маска глаза главного передатчика:						
3	Длительность фронта/спада перекрестного сигнала (20-80%) (Tr, Tf)	8180		34		пс
4	Амплитуда перекрестного сигнала (пик-пик, дифференциальный)	8180		1000		mV
5	Длительность фронта/спада сигнала (20-80%) (Tr, Tf)	8180	34			пс
6	Общий джиттер (пик-пик) (Tj)	PRBS31			0,28	UI (пик-пик)
7	Джиттер, зависящий от данных (пик-пик) (DDJ)	PRBS9			0,1	UI (пик-пик)
8	Сжатие импульса, зависящее от данных (пик-пик) (DDPWS)	PRBS9			0,055	UI (пик-пик)
9	Некоррелированный джиттер (ср. кв.) (UJ)	PRBS9			0,023	UI (пик-пик)
10	Qsq передатчика	8180	50			
11	Коэффициент попадания в маску глаза (коэффициент попадания в маску 5x10 ⁻⁵)	PRBS31	X1=0,12UI, X2=0,33UI, Y1=95 mV, Y2=350 mV			
Выходные характеристики главного передатчика по меди (хост SFP+, поддерживающий непосредственно подключаемые кабели)						
12	Амплитуда модулирующего напряжения (пик-пик)	8180	300			mV
13	Синфазное напряжение выхода Qsd передатчика	8180	63,1			
14	Синфазное выходное переменное напряжение	PRBS31			12	mV (ср. кв.)
15	TWDPc на выходе хоста	PRBS9			10,7	dBe

работчиков предпочитает пользоваться осциллографами реального времени, поскольку это упрощает переход в режим отладки. Кроме того, при использовании осциллографов, поддерживающих полосу пропускания более 30 ГГц и высокую частоту дискретизации, такие характеристики как длительность фронта и полоса сигнала более не являются ограничивающими факторами, как было всего несколько лет назад. Тем не менее, проблема заключается в интерпретации спецификаций осциллографа реального времени относительно осциллографа эквивалентного времени.

Еще одна проблема, к которой следует подготовиться, связана с тем, что спецификация SFP+ требует выполнения некоторых измерений с помощью сигнала PRBS31. Некоторые измерения (общий джиттер и частота попадания в маску глаза) рекомендуется выполнять с использованием сигнала PRBS31. Максимальная длина записи, поддерживаемая популярными осциллографами реального времени высшего класса, равна

конкретным передатчиком по отношению к моделируемому многомодовому оптоволоконному кабелю и приемнику с точно известными характеристиками. Концепция оптического волокна была расширена для оценки характеристик высокоскоростных медных соединений «10GSFP+Cu».

Сценарий TWDPC (стандарт 802.3aq, 10GBASE-LRM) обрабатывает шаблон PRBS9, требуя не менее 16 выборок на единственный интервал. Учитывая большое число эксплуатируемых осциллографов эквивалентного времени с длиной записи около 4000 выборок, требование к 16 выборкам на единственный интервал было уменьшено до семи.

Смягчение требований с 16 выборок на единственный интервал до семи привело к тому, что число измерений TWDPC для худшего случая 0,24 дБ стало превышать 30. Для тестируемых устройств, уже имеющих высокий TWDPC, значение 0,24 дБ может означать границу между положительным и отрицательным исходом разбраковки.

передатчика, маска глаза и выходные характеристики главного передатчика по меди. Приведенные цифры дают полное представление о характеристиках.

И хотя для модуля передатчика нужно выполнять более 10 измерений, в табл. 2 перечисляются 10 самых важных измерений, необходимых для правильной оценки. Они разделены на две группы: входные электрические характеристики модуля передатчика и характеристики джиттера и маски глаза модуля передатчика.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ

Чтобы преодолеть проблемы тестирования и ускорить получение результата, производители контрольно-измерительного оборудования разработали решения, способные быстро выполнять все измерения SFP+, создавать отчеты и при необходимости обеспечивать доступ к режиму отладки.

Используя такое решение, инженер может выбрать все необходимые измерения и выполнить их, просто нажав кнопку запуска.

Таблица 2

10 НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯ ПЕРЕДАТЧИКА

№	Измерение	Рекомендованный тип сигнала	Значение			Ед. изм.
			Мин.	Ном.	Макс.	
Входные электрические характеристики модуля передатчика:						
1	Допуск на синфазное переменное напряжение	PRBS31	15			мВ
2	Допуск на входное несимметричное напряжение	PRBS31	-0,3		4	В
Джиттер и маска глаза модуля передатчика						
3	Длительность фронта/спада перекрестного сигнала (20-80%) (Tr, Tf)	8180		34		пс
4	Амплитуда перекрестного сигнала (пик-пик, дифференциальный)	8180		1000		мВ
5	Синфазное выходное переменное напряжение	PRBS31			0,15	мВ (ср. кв.)
6	Общий джиттер (пик-пик) (Tj)	PRBS31			0,28	UI (пик-пик)
7	Джиттер, зависящий от данных (пик-пик) (DDJ)	PRBS9		0,1		UI (пик-пик)
8	Сжатие импульса, зависящее от данных (пик-пик) (DDPWS)	PRBS9		0,055		UI (пик-пик)
9	Некоррелированный джиттер (ср. кв.) (UJ)	PRBS9		0,023		UI (ср. кв.)
10	Коэффициент попадания в маску глаза (коэффициент попадания в маску 5×10^{-5})	PRBS31	X1=0,12UI, X2=0,33UI, Y1=95 мВ, Y2=350 мВ			

200 миллионам выборок. При частоте дискретизации 50 Гвыб./с осциллограф может захватить примерно 40 млн. единичных интервалов (UI), а при частоте дискретизации 100 Гвыб./с — 20 млн. единичных интервалов. Но шаблон PRBS31 содержит более 2 млрд. UI. Поэтому захват всего шаблона представляется проблематичным. Кроме того, для захвата записи длиной 200 млн. точек требуются огромные вычислительные ресурсы и время. Один из способов решения этой проблемы заключается в обработке сигнала PRBS31 как сигнала произвольной формы и в захвате фрагментов умеренной длины от 2 до 10 млн. точек для восстановления тактовой частоты и обработки результатов. Это позволяет достичь удачного компромисса между вычислительной мощностью и точностью результатов.

ИЗМЕРЕНИЯ TWDPC

Поскольку измерение TWDPC (оценка искажения электрического сигнала передатчика) дает множество подробной информации о состоянии устройства SFP+, его надо освоить в первую очередь. Это измерение требует применения специального алгоритма, определенного в спецификации SFP+.

Этот тест определяет меру ухудшения детерминированной дисперсии, вызванного

При захвате минимальных семи выборок на единственный интервал в ходе измерения TWDPC для выходных характеристик главного передатчика SFP+ по меди, необходима частота дискретизации более 70 Гвыб./с. Осциллографы реального времени, предлагающие более высокие частоты дискретизации — 100 Гвыб./с и больше — имеют значительно больше шансов получить точные результаты для TWDPC по сравнению с осциллографами с меньшей частотой дискретизации.

Во всех случаях для обеспечения необходимой точности измерений важно, чтобы скорость передачи данных сигнала SFP+ соответствовала полосе пропускания осциллографа. При скорости передачи данных 10,3125 Гвыб./с и минимальной длительности фронта 34 пс, для удовлетворения минимальных требований SFP+ необходим осциллограф с полосой пропускания не менее 16 ГГц. Как уже отмечалось, частота дискретизации тоже является важным фактором для измерения TWDPC.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Как показано в табл. 1, спецификация определяет 15 измерений, разбитых на три категории: электрические характеристики главного передатчика, джиттер главного

В этом случае, на выполнение последовательности из 15 измерений может уйти не несколько часов, а всего 15 минут. Кроме того, используемое программное обеспечение позволяет глубже проанализировать исходные причины проблем без помощи других приборов. К тому же, поддержка TWDPC позволяет обойтись без разработки собственных программ для выполнения этого сложного и длительного измерения.

ПО автоматизированного тестирования соответствует стандарту SFF-8431 версии 4.1, которая требует измерения дифференциальных сигналов, таких как 8180, PRBS9 и PRBS31. И хотя стандарты требуют, чтобы некоторые измерения, такие как некоррелированный джиттер и общий джиттер, выполнялись на сигналах PRBS31, вместо этого они также допускают применение сигнала PRBS9. Следовательно, важно, чтобы программа позволяла выбирать разные типы сигнала.

Также важно иметь доступ к сводным отчетам, как правило, в формате .mht, который является разновидностью формата HTML. Такой отчет должен содержать результаты всех измерений, включая подробную информацию об измерительной схеме, описание сигналов, графики и т.д. Полезна также подробная информация о схеме из-

мерений, такая как данные калибровки, модель осциллографа, модель пробника, версия программного обеспечения и время выполнения. Эта информация помогает гарантировать согласованность и воспроизводимость теста.

ТЕСТОВАЯ ОСНАТКА ДЛЯ ХОСТА

Для обеспечения согласованных результатов и простоты подключения измерительной системы стандарт SFF-8431 определяет обязательные применения тестовой оснастки. Как показано на рис. 1, тестовая оснастка поставляется с DC блоком, поскольку спецификация определяет обязательное выполнение некоторых измерений с применением DC блоков. Одной из проблем было разбеднение тестовой оснастки и тестируемого устройства, поскольку возникал риск повреждения тестовой оснастки. В таких случаях полезно использовать специальный разъединяющий механизм.



Рис. 1. Выпускается два варианта тестовой оснастки — одна с DC блоками и оконечной нагрузкой, а другая без них

Тестовая оснастка для хоста является наиболее широко используемым типом оснастки. Она выпускается в двух вариантах: с DC блоком и оконечной нагрузкой или без них. Для выполнения измерений, в полном соответствии со спецификациями, рекомендуется использовать тестовую оснастку с DC блоком. Подобно тестовой оснастке для хоста, оснастка для тестирования модуля тоже выпускается в двух вариантах: с DC блоком и оконечной нагрузкой, а другой — без них.

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРИЕМНИКОВ

В отличие от тестирования передатчиков, в процессе которого разработчик должен убедиться в достаточном качестве входного сигнала, при тестировании приемников на них необходимо подавать сигнал достаточно низкого качества. Для этого создается сжатый глаз, представляющий сигнал наилучшего случая. Затем этот оптический сигнал калибруется с помощью измерения джиттера и оптической мощности.

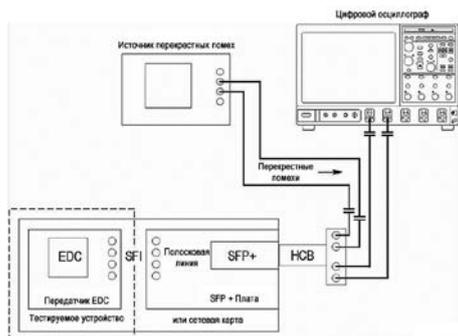


Рис. 2. Типовая схема тестирования SFP+

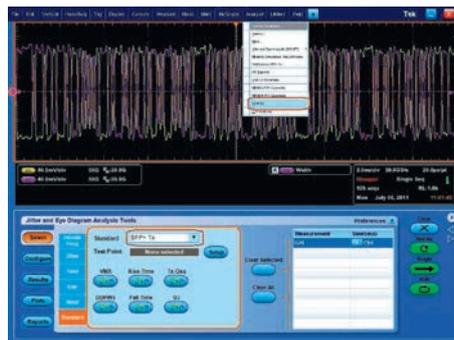


Рис. 3. Интерфейс пользователя SFP-Tx позволяет настраивать и запускать тесты, выбирая их из меню

Кроме того, электрический выход приемника нужно проверить с помощью трех базовых категорий тестов. Эти тесты включают тестирование по маске для обеспечения достаточно широкого открытия глаза, тестирование бюджета джиттера для выявления уровня джиттера разного типа и отслеживание отклонения джиттера для определения способности встроенной схемы восстановления тактовой частоты отслеживать джиттер в полосе захвата.

ТЕСТИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТЧИКОВ SFP+

Показанная на рис. 2 типовая схема тестирования содержит тестируемое устройство и источник сигнала, генерирующий все необходимые искажения. Решение SFP-TX, реализованное на основе осциллографов Tektronix, предлагает выпадающее меню, показанное на рис. 3, которое позволяет выбрать измерения для тестирования SFF-8431 SFP+. Маски, предельные значения и параметры измерения могут настраиваться автоматически. Кроме того, эта схема позволяет изменять выбранные измерения и их конфигурацию. После сборки испытательного стенда и подключения тестируемого устройства пользователь щелкает кнопку Пуск, и выполняется выбранный набор тестов. Программа предлагает пользователю переключить тестируемое устройство в определенные режимы, выводя через регулярные интервалы всплывающие сообщения.

По завершении цикла тестирования автоматически создается сводный отчет в формате .MHT (MHTML) с информацией о разработке типа «голен/не голен». Как показано на рис. 4, отчет включает информацию о конфигурации теста, развертки сигналов и анализ предельных значений, что позволяет глубже понять работу устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя технология SFP+ существенно упрощает функциональность оптического модуля 10G, появляется целый ряд новых метрологических проблем. С ростом плотности портов SFP+ возникает потребность в автоматизации, вызванная продолжительным тестированием устройств с числом портов 48 и более на одну стойку. Другие проблемы включают потребность гладкого перехода от проверки на соответствие стандарту к отладке, потребность в специализированных тестовых оснастках и в применении осциллографов реального

времени вместо осциллографов эквивалентного времени.

Одним из наиболее важных тестов SFP+ является оценка искажения электрического сигнала передатчика или TWDPc. Этот тест определен, как разность (в дБ) между опорным отношением сигнала к шуму (С/Ш) и эквивалентным С/Ш на входе ограничителя приемника эталонного эквалайзера для измеряемого сигнала после прохождения через исследуемый канал. Измерение TWDPc включает регистрацию сигнала передатчика и обработку его для расчета ухудшения сигнала на эталонном эквалайзере. Это измерение является обязательным для проверки SFP+ на соответствие стандарту, но выполнение этого измерения без соответствующих инструментов и инструкций может оказаться весьма непросто.

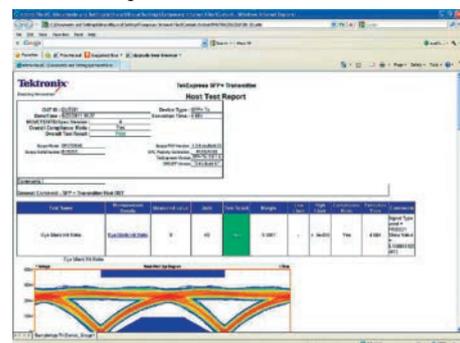


Рис. 4. Отчет об испытаниях хоста SFP+ в формате MHTML включает информацию о конфигурации теста, развертки сигналов и анализ предельных значений

Сложность тестирования и отладки SFP+ можно существенно снизить за счет автоматизации большей части повторяющихся тестов, необходимых для измерения и анализа параметров модулей. Маски глазковых диаграмм, предельные значения и набор параметров измерений могут настраиваться автоматически, тогда как пользователь может изменять определенные измерения и условия их выполнения. Программное обеспечение с такими возможностями может использоваться в совокупности с оборудованием для тестирования физического уровня, включая осциллографы и специальную тестовую оснастку для проверки полупроводниковых приборов, кабелей и разъемов, для отладки и тестирования на соответствие стандарту, а также для производственного тестирования.

SFT+ is a compact, hot-pluggable transceiver used for both telecommunication and data communications applications. It's important to know the main problems connected with testing of the devices which support SFT+. Therefore the present article demonstrates the main advantages of SFT+ and shows those problems that can occur while testing. The article contains the description of TWDPc measurements connected with SFP+ verification and the relevant problems when testing physical level. Find more details about measuring devices, testing tools, debugging and standards testing in the present article.